三氟甲吡醚对小菜蛾生长发育和繁殖的亚致死效应*

贾变桃** 闫 坤 钟婧尹 胡希超 贾 栋***

（山西农业大学植物保护学院，农业有益生物利用与生态农药创制山西省重点实验室，太谷 030801）

摘 要 **【目的】** 探究三氟甲吡醚对小菜蛾 *Plutella xylostella* 的亚致死效应，为小菜蛾的防治和三氟甲吡醚的合理使用提供理论依据。**【方法】** 采用浸叶法测定三氟甲吡醚对小菜蛾幼虫的毒力，选取亚致死浓度 LC_{10}（1.56 mg/L）和 LC_{25}（4.37 mg/L）处理 3 龄幼虫，通过两性生命表法分析其对小菜蛾生长发育及种群参数的影响。**【结果】** 三氟甲吡醚亚致死浓度显著降低小菜蛾幼虫存活率、化蛹率、羽化率和蛹重（$P < 0.05$），抑制作用随浓度升高而增强，LC_{25} 处理组蛹前累计死亡率达 68.50%；显著延长 3 龄幼虫至化蛹历期和蛹期（$P < 0.05$），LC_{25} 处理组 3 龄幼虫至化蛹历期和蛹期分别较对照组延长 3.62 和 0.42 d；LC_{25} 处理显著缩短雌雄成虫寿命、降低羽化雌虫比例（$P < 0.05$），两浓度对单雌产卵量与卵孵化率无显著影响，但延迟繁殖高峰；种群净增殖率（R_0）、内禀增长率（r_m）、周限增长率（λ）显著下降（$P < 0.05$），世代历期（T）明显延长（$P < 0.05$），LC_{25} 处理组 R_0（5.41）较对照（30.30）降低 82.1%。**【结论】** 三氟甲吡醚亚致死浓度可显著抑制小菜蛾的生长发育与种群增长，研究结果为基于亚致死效应调控小菜蛾种群及三氟甲吡醚在田间与其他药剂的合理轮换使用提供了重要的理论依据。

关键词 小菜蛾；三氟甲吡醚；毒力；亚致死效应；种群参数

Sublethal effects of pyridalyl on the development and reproduction of *Plutella xylostella*

JIA Bian-Tao** YAN Kun ZHONG Jing-Yin HU Xi-Chao JIA Dong***

(Shanxi Key Laboratory of Bioagent Utilization and Eco-Pesticide Innovation, College of Plant Protection, Shanxi Agricultural University, Taigu 030801, China)

Abstract **[Aim]** To investigate the sublethal effects of pyridalyl on *Plutella xylostella* and thereby provide useful information for the control of this pest and the rational application of pyridalyl. **[Methods]** The toxicity of this insecticide to 3rd instar *P. xylostella* larvae was determined using the leaf dipping method. Larvae were treated with two sublethal concentrations, LC_{10} (1.56 mg/L) and LC_{25} (4.37 mg/L), and the effects of these treatments on their growth, development, and other population parameters, were analyzed using life tables for each sex. **[Results]** Sublethal concentrations of pyridalyl significantly reduced larval survival, pupation, and emergence, rates, and also reduced pupal weight ($P < 0.05$) in a dose dependent fashion. The cumulative pre-pupal mortality rate reached 68.50% in the LC_{25} treatment group. The duration of the period from the 3rd instar to pupation, the pupal stage, and the pre-adult period, were significantly prolonged ($P < 0.05$). The duration of the period from the 3rd instar to pupation, and the pre-adult period, of the LC_{25} treatment group were 68.6% and 47.5%, respectively, longer than those of the control group. The lifespan of male and female adults in the LC_{25} treatment group were significantly shorter, and a lower the proportion of females entered eclosion, compared to the control group ($P < 0.05$). Neither treatment significantly affected the number of eggs laid per female or the hatching rate, but both delayed the peak of reproductive activity. The net reproductive rate (R_0), intrinsic growth rate (r_m), and finite rate of increase (λ) of the population

*资助项目 Supported projects：山西农业大学科技创新提升工程（CXGC2023011）；山西省现代农业产业技术体系建设专项（2026CYJSTX18）；山西农业大学植物保护学院科研培育创新项目（ZBXY23B-6）

**第一作者 First author，E-mail：jiabtao@foxmail.com

***通讯作者 Corresponding author，E-mail：biodong@foxmail.com

收稿日期 Received：2025-12-18；接受日期 Accepted：2026-05-27

were significantly lower ($P < 0.05$), whereas the generation period (T) was significantly prolonged ($P < 0.05$). R_0 of the LC_{25} treatment group (5.41) was 82.1% less that of the control group (30.30). **[Conclusion]** Sublethal concentrations of pyridalyl can significantly inhibit the development and population growth of *P. xylostella.* The results provide useful information for regulating *P. xylostella* populations with sublethal doses of pyridalyl, and for the rational rotation of pyridalyl with other pesticides.

Key words *Plutella xylostella*; pyridalyl; toxicity; sublethal effect; population parameters

小菜蛾 *Plutella xylostella* 属鳞翅目菜蛾科，是一种全球性分布的十字花科蔬菜专性害虫。其适生区域广、繁殖速度快、扩散能力强、寄主适应范围宽，且易产生抗药性，已成为全球农业生产中最具破坏力的害虫之一（Talekar and Shelton, 1993）。在热带和亚热带地区，该虫危害尤为严重，种群爆发时可导致十字花科蔬菜产量损失超过 90%（Verkerk and Wright, 1996）。据估算，全球每年因小菜蛾为害造成的直接经济损失及防治成本高达 40 亿-50 亿美元（Zalucki *et al.*, 2012；Furlong *et al*., 2013）。我国是世界蔬菜生产大国，蔬菜总产量约占全球 50%以上，其中十字花科蔬菜的种植面积约占全国蔬菜总面积的 30%（王延斌，2020）。小菜蛾的常年爆发已成为制约该类蔬菜优质高产的关键因素，每年约造成 7.7 亿美元的经济损失（Li *et al*., 2016），对我国蔬菜产业可持续发展构成严重威胁。

目前，小菜蛾的防治仍以化学防治为核心手段。然而，受其繁殖速度快、世代周期短等生物学特性的影响，加之田间杀虫剂的长期连续滥用，导致小菜蛾对多种杀虫剂产生了不同程度的抗药性，成为抗药性最突出、最难防控的害虫之一（陈思宇等，2024）。有害生物抗药性的增加，不仅使有效药剂种类日趋减少、田间防治难度显著增加，还因用药频次与剂量提升进一步推高了防治成本，并对农田生态环境构成潜在威胁。因此，为构建可持续的小菜蛾综合防控体系，减轻其对十字花科蔬菜产业造成的经济损失，研发和推广新型高效、低毒、低残留杀虫剂已成为当前迫切需求。

三氟甲吡醚（Pyridalyl，又名啶虫丙醚）是由日本住友化学公司研发的新型杀虫剂，2011 年在我国正式登记用于防治甘蓝上的小菜蛾（谷旭林等，2012）。该药作用机制目前尚未明确，因此被杀虫剂抗性行动委员会（Insecticide Resistance Action Committee，IRAC）归入作用机制未知类别（Sparks *et al*., 2020），其主要通过触杀和/或胃毒作用对鳞翅目和缨翅目等多种农林害虫表现出优异的杀虫活性（Isayama *et al*., 2005），尤其对已产生抗药性的鳞翅目害虫（如小菜蛾）具有突出的防治效果（石小清等，2003）。值得关注的是，三氟甲吡醚对哺乳动物毒性较低，且对寄生蜂、捕食性昆虫、捕食性螨类及传粉昆虫等有益生物安全性较高（Isayama *et al*., 2005；Sakamoto *et al*., 2012），契合绿色防控理念。因此，该药剂在小菜蛾综合防治体系的构建及抗药性治理中展现出广阔的应用前景，有望成为替代传统高风险药剂的理想选择。

杀虫剂田间施用后，受空间异质性与时间衰减效应影响，昆虫实际接触的药剂剂量存在显著差异。尽管高剂量药剂可直接杀死部分个体，但存活个体往往暴露于亚致死剂量下，从而产生一系列亚致死效应（Cutler, 2013）。关于亚致死剂量的定义，Haynes（1988）认为是指对昆虫个体造成一定的毒害但未致其死亡，且个体仍保留部分行为能力的剂量；而 Desneux 等（2007）则从种群角度将其界定为不引起昆虫种群出现明显死亡的剂量。在相关研究中，通常将低于 LC_{50} 的剂量（如 LC_{10}、LC_{25} 等）视为亚致死剂量进行评估（Franca *et al*., 2017）。杀虫剂对昆虫的亚致死效应具有显著的物种特异性、药剂依赖性和剂量依赖性（马冲等，2012），其表现形式呈现双向性：一方面可抑制害虫生长发育与繁殖，如降低化蛹率、羽化率、产卵量及孵化率，从而抑制种群增长（Mahmoudvand and Moharramipour, 2015；Su and Xia, 2020；Liu *et al*., 2022）；另一方面也可能刺激害虫增殖，引发种群再猖獗（Wang *et al*., 2016；Zhao *et al*., 2018），或诱导害虫抗药性相关基因表达，加速抗药性演化（Yin *et al*., 2009；龚佑辉等，2010；Guedes and Cutler,

2014)。因此，系统解析杀虫剂对靶标害虫的亚致死效应，对于精准预判害虫种群动态、优化化学防治策略、构建可持续的综合防控体系具有重要的理论价值与实践指导意义。

三氟甲吡醚作为已登记用于防治小菜蛾的药剂，其抗性演化已成为当前研究热点，已有多项研究聚焦于小菜蛾对该药剂的抗药性现状及相关机理（孙杨等，2018；Yin *et al*., 2019；Wang *et al*., 2020, 2021)。然而，关于三氟甲吡醚亚致死浓度对小菜蛾生长发育、繁殖特性及种群动态的系统性影响，目前相关研究仍较为匮乏。本研究以小菜蛾 3 龄幼虫为供试对象，设置亚致死浓度 LC_{10} 和 LC_{25} 处理组，系统测定药剂对其生长发育及繁殖能力的影响；同时采用两性生命表方法，量化分析亚致死浓度下小菜蛾种群参数（如内禀增长率、净增殖率等）的变化特征。研究结果可为明确三氟甲吡醚的生态效应、优化其田间使用策略，以及构建小菜蛾综合防治体系提供理论支撑和实践参考。

1　材料与方法

1.1　供试材料

供试昆虫：小菜蛾室内种群 2012 年 10 月采集于山西省晋中市太谷区郊区甘蓝田，在实验室长期饲养，作为敏感种群（Susceptible population，简称 SP)。田间种群（Field population，简称 FP）于 2023 年 7 月在太谷县郊区甘蓝种植区采集，饲养 F_1 代进行生物测定。幼虫饲喂未接触过药剂的新鲜甘蓝叶片，化蛹后放置于养虫笼中，成虫羽化后用 10%的糖水提供营养，放置新鲜甘蓝叶片以收集卵。饲养条件：温度（25±1）℃，湿度 70%左右，光周期 16L∶8D。

供试药剂：10.5%三氟甲吡醚乳油，日本住友化学株式会社生产。

1.2　生物测定方法

1.2.1　三氟甲吡醚对小菜蛾 3 龄幼虫的毒力测定　采用浸叶法测定（贾变桃等，2015)。依据预试验结果，将 10.5%三氟甲吡醚乳油用含有 0.02%的 Triton X-100 水溶液等比梯度稀释，设置 7 个药剂浓度梯度，以含 0.02%的 Triton X-100 的水溶液作为对照。将甘蓝叶片剪为直径约 5 cm 的叶碟，于各浓度药液中浸渍 20 s，取出室温自然晾干。在直径 6.5 cm 的塑料培养皿内铺湿润滤纸保湿，随后将晾干的叶碟放入，每皿放 1 张叶片，接入大小一致、健康活泼的 3 龄幼虫 10 头，每处理重复 4 次。所有处理均置于温度（25±1）℃、相对湿度 70%左右、光周期 16L∶8D 的人工气候箱中培养。处理 72 h 后检查各组试虫存活情况，以镊子轻触虫体无明显活动反应判定为死亡。

1.2.2　三氟甲吡醚对小菜蛾 3 龄幼虫的亚致死效应　根据毒力测定结果，选用小菜蛾室内敏感种群开展亚致死效应研究，以三氟甲吡醚对该种群的 LC_{10} 和 LC_{25} 作为处理浓度。将新鲜甘蓝叶片剪取后，浸入相应浓度的药液中 20 s，取出后置于室温下自然晾干，随后放入底部铺有保湿滤纸、直径 6.5 cm 的塑料培养皿中；对照组叶片则采用含 0.02%的 Triton X-100 的水溶液进行同等方式处理。每培养皿接入 10 头幼虫为一个重复，对照组 15 次重复，药剂处理组各 20 次重复。分别于处理后 24、48、72 h 记录各组幼虫存活情况。72 h 后将各组中存活幼虫单头转入直径 3.5 cm 的小培养皿中，以新鲜甘蓝叶片继续饲养；每隔 12 h 检查记录一次，及时更换新鲜叶片，持续跟踪记录各组幼虫的存活、发育历期和化蛹状况。饲养条件同 1.2.1 节。

成虫羽化后，选取同日羽化的雌雄成虫，将其引入 2 cm×8 cm 的指形管中，进行配对编号，管内放置一张新鲜甘蓝叶片，用于刺激成虫产卵，管底放入蘸有 10%糖水的棉花球供成虫取食。各处理组成虫配对数量如下：对照组配对 29 对，LC_{10} 处理组配对 15 对，LC_{25} 处理组配对 10 对。饲养条件同上。试验期间每日收卵，同时更换干净试管及新鲜甘蓝叶片。统计成虫寿命以及每个单对每日产卵量。从各处理组前 3 d 所产卵粒中分别随机选取 300-500 粒，在相同饲养条件下持续观察卵的孵化情况，并计算孵化率。

1.3　数据分析

利用 POLO-Plus 1.0 软件计算三氟甲吡醚对

小菜蛾 3 龄幼虫的 LC_{10}、LC_{25} 和 LC_{50} 值及 95% 置信限、斜率±标准误及卡方值和自由度。Microsoft Excel 2021 软件处理小菜蛾各虫态的存活率、蛹重、孵化率、性比等，使用 SPSS 21.0 软件计算各组平均值±标准误（Standard error, SE），进行单因素方差分析，采用 Duncan 氏多重比较法检验组间差异，以 $P < 0.05$ 为差异有统计学意义。发育历期、单雌产卵量及各项种群参数采用两性生命表软件 TWOSEX-MSChart 程序（2021）进行统计分析。其中，特定年龄阶段存活率（Age-stage specific survival rate，S_{xj}）指昆虫种群中，存活至年龄 x、发育阶段 j 的个体比例；特定年龄存活率（Age-specific survival rate, l_x）指个体存活至年龄 x 的概率；特定年龄繁殖力（Age-specific fecundity, m_x）指年龄 x 存活个体的平均产卵量；年龄-阶段繁殖值（Age-stage reproductive value，v_{xj}）是指年龄 x、发育阶段 j 的个体对未来种群的预期贡献；年龄-阶段生命期望（Age-stage life expectancy，e_{xj}）是年龄 x、发育阶段 j 的个体，在剩余生命中预期能存活的时间。内禀增长率（r_m）、净生殖率（R_0）、平均世代周期（T）和周限增长率（λ）为种群增长相关参数，均基于两性生命表理论（Chi and Liu, 1985；Chi, 1988）计算。采用自助抽样法（Bootstrap procedure）通过 10 万次重抽样计算获得生命表参数的均值与标准误，并使用 TWOSEX-MS Chart 程序，通过配对自助检验（Paired bootstrap test）（$P < 0.05$）精确计算 3 组处理间的显著性差异。

2 结果与分析

2.1 三氟甲吡醚对小菜蛾的毒力

三氟甲吡醚对小菜蛾敏感和田间种群的 LC_{50} 值分别为 13.76 和 15.10 mg/L，二者 95% 置信限重叠，表明两种群对药剂的敏感性无显著差异。由于敏感种群遗传背景均一、个体间差异小、试验结果更具稳定性与可靠性，因此本研究选用敏感种群开展亚致死效应研究。根据毒力测定结果，选取处理后 72 h 引起小菜蛾 3 龄幼虫死亡率为 10%和 25%的浓度（LC_{10} 和 LC_{25}）作为亚致死浓度，分别为 1.56 和 4.37 mg/L（表 1）。

表 1 三氟甲吡醚对小菜蛾 3 龄幼虫的毒力

Table 1 Toxicity of pyridalyl to the 3rd instar larvae of *Plutella xylostella*

种群 Population	测试虫数 Number of test insect	斜率± 标准误 Slope±SE	LC_{10}（95% 置信限）（mg/L）(95% fiducial limit) (mg/L)	LC_{25}（95% 置信限）（mg/L）(95% fiducial limit) (mg/L)	LC_{50}（95% 置信限）（mg/L）(95% fiducial limit) (mg/L)	χ^2 (*df*)	毒力比 Toxicity ratio
敏感种群 Susceptible Populatin	320	1.35±0.18	1.56 (0.68-2.64)	4.37 (2.57-6.35)	13.76 (9.88-19.23)	1.88 (5)	1.00
田间种群 Field Population	280	1.38±0.21	1.78 (0.61-3.27)	4.91 (2.50-7.47)	15.10 (10.46-21.20)	1.62 (4)	1.10

2.2 三氟甲吡醚对小菜蛾幼虫生存和发育历期的亚致死效应

根据表 2 中 72 h 时的死亡率数据，计算得 LC_{10} 和 LC_{25} 处理组的校正死亡率分别为 9.64% 和 26.02%，与预设理论值基本吻合。

三氟甲吡醚 LC_{10} 和 LC_{25} 处理小菜蛾 3 龄幼虫后，死亡率呈现明显的时间依赖性和浓度依赖性：同一浓度下，随处理时间的延长死亡率逐渐升高；同一时间点，随药剂浓度的升高死亡率逐渐增高。具体来看，除处理后 48 h LC_{10} 处理组死亡率与对照无显著差异外，24、72 和 96 h 时 LC_{10} 处理组死亡率均显著高于对照（$P < 0.001$）；而 LC_{25} 处理组在 24、48、72、96 h 各时间点的死亡率，均显著高于对照和 LC_{10} 处理组（$P < 0.001$）（表 2）。此外，两个浓度处理后的蛹前累计死亡率均显著高于对照，且浓度越高，与对照的差异越显著（$P <$

表 2　亚致死浓度三氟甲吡醚对小菜蛾幼虫存活的影响

Table 2　Effects of sublethal concentrations of pyridalyl on the survival of *Plutella xylostella* larvae

处理 Treatment	死亡率（%）Mortality (%)				
	24 h	48 h	72 h	96 h	蛹前累计 Cumulative pre-pupa
CK	0.00±0.00 c	1.33±0.91 b	2.00±1.07 c	4.00±1.31 c	18.00±2.96 c
LC_{10}	4.00±1.34 b	6.95±2.06 b	11.45±2.21 b	12.45±2.04 b	30.91±4.60 b
LC_{25}	8.00±0.72 a	25.00±2.66 a	27.50±2.50 a	35.00±2.95 a	68.50±3.27 a

CK：对照，叶片经含 0.02% Triton X-100 的清水浸渍处理，下同。表中数据为平均值±标准误。同一列数据后的不同小写字母表示经单因素方差分析及 Duncan 法多重比较，在 $P < 0.05$ 水平上差异显著。表 4 同。

CK: Control, leaves treated by immersion in water containing 0.02% Triton X-100, the same below. Data in the table are presented as mean±SE. Data followed by different lowercase letters in the same column indicate significant difference at $P < 0.05$ level by one-way ANOVA followed by Duncan's multiple range test. The same for Table 4.

0.001）（表 2）。

三氟甲吡醚 LC_{10} 和 LC_{25} 处理均能显著延长小菜蛾 3 龄幼虫至化蛹的发育历期（$P < 0.001$），且浓度越高影响越显著；同时，两个亚致死浓度处理均显著延长蛹期（$P < 0.001$），其中 LC_{10} 处理主要显著延长雌蛹期（$P < 0.001$），LC_{25} 处理则主要显著延长雄蛹期（$P = 0.005$）。受上述发育阶段延长的影响，两个浓度处理均显著延长小菜蛾从 3 龄至成虫羽化前的总历期（$P < 0.001$），且浓度越高，延长效应越明显（表 3）。

2.3　三氟甲吡醚对小菜蛾化蛹、羽化及成虫繁殖的亚致死效应

三氟甲吡醚亚致死浓度处理小菜蛾 3 龄幼虫后，对其化蛹率和蛹重产生显著抑制效应（$P < 0.001$），且该抑制作用随药剂浓度升高而增强；同时，两个亚致死浓度均显著降低羽化率（$P < 0.001$），但表现出浓度效应的特殊性，LC_{10} 处理对羽化率的抑制作用反而大于 LC_{25} 处理（表 4）。

表 3　亚致死浓度三氟甲吡醚对小菜蛾发育历期的影响

Table 3　Effects of sublethal concentrations of pyridalyl on the development duration of *Plutella xylostella*

处理 Treatment	发育历期（d）Developmental duration (d)				
	3 龄幼虫至化蛹 3rd instar larva to pupation	蛹 Pupa			3 龄幼虫至成虫前 from 3rd instar larva to pre-adult
		♀	♂	平均 Mean	
CK	5.28±0.10 c	4.24±0.10 b	4.67±0.10 b	4.48±0.07 b	9.68±0.12 c
LC_{10}	6.14±0.11 b	5.07±0.12 a	4.88±0.12 ab	4.97±0.08 a	11.34±0.19 b
LC_{25}	8.90±0.28 a	4.60±0.16 b	5.05±0.09 a	4.90±0.09 a	14.28±0.40 a

CK：对照。用于各发育阶段统计虫数：3 龄幼虫至化蛹历期（CK：82、LC_{10}：69、LC_{25}：52），蛹期（CK：♀29、♂37、LC_{10}：♀15、♂17、LC_{25}：♀10、♂19），3 龄至成虫前期历期（CK：66、LC_{10}：32、LC_{25}：29）。表中数据为平均值±标准误。发育历期采用 TWOSEX-MSChart 软件（2021）进行统计分析。均值与标准误通过自助抽样法（Bootstrap procedure）经 100 000 次重抽样计算获得。处理组间显著性差异采用配对自助检验（Paired bootstrap test）进行评估，不同小写字母表示在 $P < 0.05$ 水平上差异显著。表 5 成虫寿命和单雌产卵量、表 6 种群参数分析方法同本表。

CK: Control. The number of insects used for statistical analysis: Duration from 3rd instar larva to pupation (CK: 82, LC_{10}: 69, LC_{25}: 52); pupal stage (CK: ♀29, ♂37; LC_{10}: ♀15, ♂17; LC_{25}: ♀10, ♂19); duration from 3rd instar larva to pre-adult (CK: 66, LC_{10}: 32, LC_{25}: 29). The data in the table are presented as means±SE. Developmental duration are analyzed using TWOSEX-MSChart software (2021). Means and standard errors are calculated via the bootstrap procedure with 100 000 resamples. Significant differences among treatment groups are assessed using paired bootstrap tests, and different lowercase letters indicate significant difference at the $P < 0.05$ level. The analytical methods for adult longevity and fecundity in Table 5 and population parameters in Table 6 are the same as those in this table.

表 4 三氟甲吡醚亚致死浓度对小菜蛾化蛹、羽化及蛹重的影响

Table 4 Effects of pyridalyl on the pupation, adult emergence and pupal weight of *Plutella xylostella*

处理 Treatment	化蛹率（%） Pupation rate (%)	蛹重（mg） Pupal weight (mg)	羽化率（%） Adult emergence rate (%)
CK	82.00±2.96 a	5.11±0.07 a	80.38±5.20 a
LC_{10}	69.09±4.60 b	4.64±0.08 b	46.05±0.86 c
LC_{25}	31.50±3.27 c	4.33±0.15 c	56.24±1.80 b

蛹重统计虫数：CK（123）、LC_{10}（136）、LC_{25}（61）。

The number of pupae used for statistical analysis of pupal weight: CK (123), LC_{10} (136), LC_{25} (61).

三氟甲吡醚亚致死浓度处理小菜蛾幼虫后，对其成虫相关生物学特性的影响存在浓度差异性：LC_{10} 处理对雌、雄成虫寿命及羽化雌虫比例均无显著影响（$P > 0.05$），仅使平均单雌产卵量略低于对照，但差异不显著（$P = 0.269$）；而 LC_{25} 处理显著缩短雌、雄成虫寿命（$P < 0.05$）（比对照组分别减少了 1.58 和 1.76 d），且显著降低羽化雌虫比例（$P = 0.023$），其平均单雌产卵量同样低于对照，但未达显著水平（$P = 0.392$）。卵孵化率方面，LC_{10} 和 LC_{25} 处理与对照相比均无显著差异（$P = 0.089$），但 LC_{10} 处理组的卵孵化率显著高于 LC_{25} 处理组（表 5）。

表 5 亚致死浓度三氟甲吡醚对小菜蛾成虫寿命及繁殖力的影响

Table 5 Effects of sublethal concentrations of pyridalyl on adult longevity and fecundity of *Plutella xylostella*

处理 Treatment	成虫寿命（d）Longevity of adult (d)			雌虫比例（%） Female proportion (%)	平均单雌产卵量 Number of eggs laid per female	孵化率（%） Hatching rate (%)
	♀	♂	平均 Mean			
CK	8.27±0.52 a	7.76±0.53 a	7.98±0.37 a	43.46±2.48 a	104.45±9.31 a	64.07±2.15 ab
LC_{10}	7.54±0.69 ab	8.41±0.70 a	8.00±0.49 a	45.77±2.14 a	90.85±8.26 a	71.08±2.65 a
LC_{25}	6.70±0.47 b	6.00±0.46 b	6.24±0.34 b	34.66±2.01 b	89.82±14.44 a	62.67±2.16 b

表中数据为平均值 ± 标准误。CK：对照。成虫寿命统计虫数：CK（♀29、♂37）、LC_{10}（♀15、♂17）、LC_{25}（♀10、♂19）。

Data are presented as mean±SE. CK: Control The number of adults used for statistical analysis of adult longevity: CK (♀29, ♂37), LC_{10} (♀15, ♂17), LC_{25} (♀10, ♂19).

2.4 不同处理下小菜蛾的特定年龄-阶段存活率（S_{xj}）

不同处理下小菜蛾的特定年龄-阶段存活率见图 1。由图 1 可知，幼虫、蛹及成虫的存活曲线在不同日龄存在重叠，表明种群个体发育进度存在明显异质性。与对照组相比，三氟甲吡醚 LC_{10} 和 LC_{25} 处理组均显著降低了小菜蛾各发育阶段的存活率，其中成虫期存活率下降尤为明显。此外，三氟甲吡醚处理还延迟了小菜蛾的化蛹和羽化时间：对照组幼虫于第 4 天开始化蛹，蛹于第 8 天开始羽化；而 LC_{10} 处理分别延迟至第 5 天开始化蛹，第 10 天开始羽化；LC_{25} 处理组延迟效应更显著，分别于第 7 天开始化蛹，第 12 天开始羽化。

2.5 不同处理下小菜蛾的特定年龄存活率（l_x）和特定年龄繁殖力（m_x）

所有处理组小菜蛾 3 龄幼虫均能完成从幼虫到蛹、成虫的发育过程，并成功繁殖下一代。特定年龄存活率（l_x）曲线在各处理间趋势一致，但 LC_{25} 处理组的存活率下降速率明显更快（图 2）。繁殖特性方面，所有处理均呈现明显的产卵高峰，但高峰出现时间、峰值及后续繁殖动态存在差异：对照组产卵高峰出现在第 10 天，单雌产卵量达 12.57 粒，随后产卵量逐渐下降，到第 16 天又出现一个产卵小高峰（单雌产卵 5.77 粒）；LC_{10} 处理组产卵高峰期延迟至第 12 天，峰值降

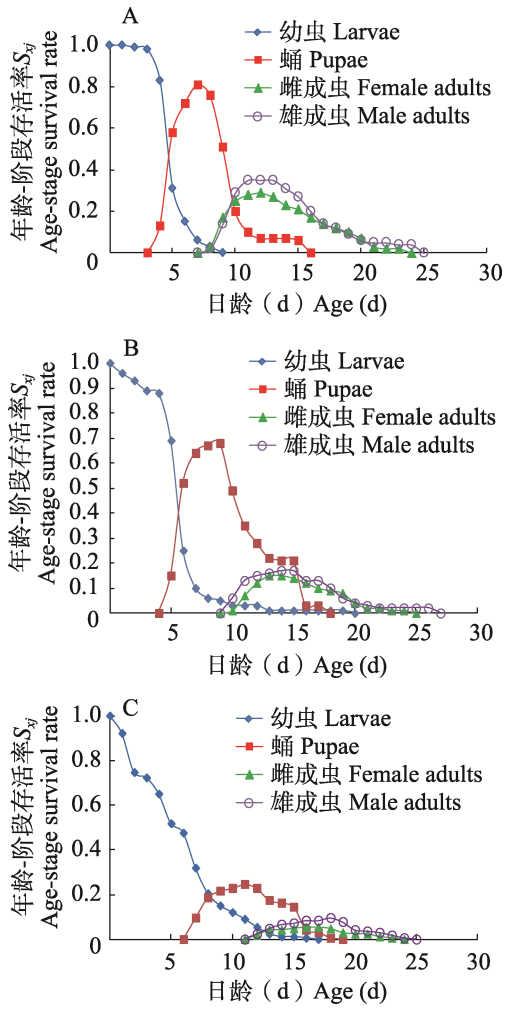


图 1　不同处理下小菜蛾的特定年龄-阶段存活率（S_{xj}）

Fig. 1　Age-stage specific survival rates (S_{xj}) of *Plutella xylostella* treated with sublethal concentrations of pyridalyl

A. CK：对照；B. LC_{10}；C. LC_{25}。
A. CK: Control; B. LC_{10}; C. LC_{25}.

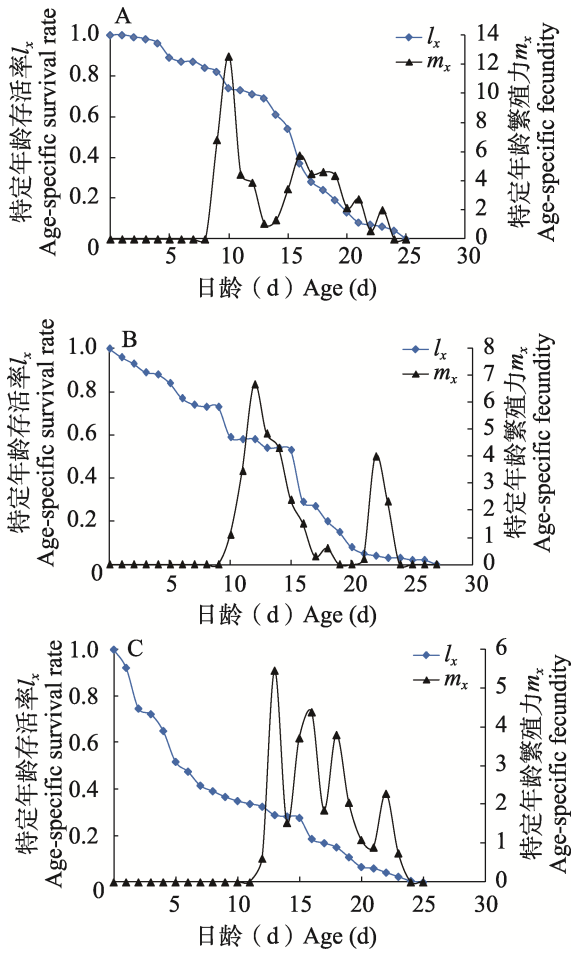


图 2　不同处理下小菜蛾特定年龄存活率（l_x）和特定年龄繁殖力（m_x）

Fig. 2　Age-specific survival rate (l_x) and age-specific fecundity (m_x) of *Plutella xylostella* treated with sublethal concentrations of pyridalyl

A. CK：对照；B. LC_{10}；C. LC_{25}。
A. CK: Control; B. LC_{10}; C. LC_{25}.

至 6.67 粒/雌，后续于第 22 天又出现一个小高峰（4.00 粒/雌）；LC_{25} 处理组的产卵高峰进一步延迟至第 13 天，峰值仅 5.46 粒/雌，且高峰后出现 3 个连续的产卵小高峰（图 2）。从单雌产卵量来看，LC_{10} 和 LC_{25} 处理组虽低于对照组，但差异未达显著水平（$P > 0.05$，表 5）由此可见，三氟甲吡醚亚致死浓度主要延迟了小菜蛾的产卵高峰时间并降低了峰值，但对总产卵量无显著影响。

2.6　不同处理下小菜蛾的年龄-阶段繁殖值（v_{xj}）

小菜蛾幼虫期和蛹期对后代的生殖贡献有限，但当雌成虫出现后，v_{xj} 呈急剧上升趋势：对照组在第 9 天雌成虫期达到峰值 76.25，LC_{10} 处理组于第 10 天达到峰值 132.42，LC_{25} 处理组在第 12 天达到峰值 89.99。尽管 LC_{10} 和 LC_{25} 处理组 v_{xj} 峰值高于对照组，但两者的繁殖值曲线下降速率相对更快（图 3）。由于雄虫的繁殖值为 0，图 3 中未呈现雄虫的相关曲线。

2.7　不同处理下小菜蛾的年龄-阶段生命期望（e_{xj}）

图 4 呈现了各处理组小菜蛾在不同年龄 x 和虫态 j 下的 e_{xj} 变化。结果显示，所有处理组的 e_{xj} 均随虫龄增长呈现下降趋势，且三氟甲吡醚亚致死浓度处理组的期望寿命普遍低于对照组。对

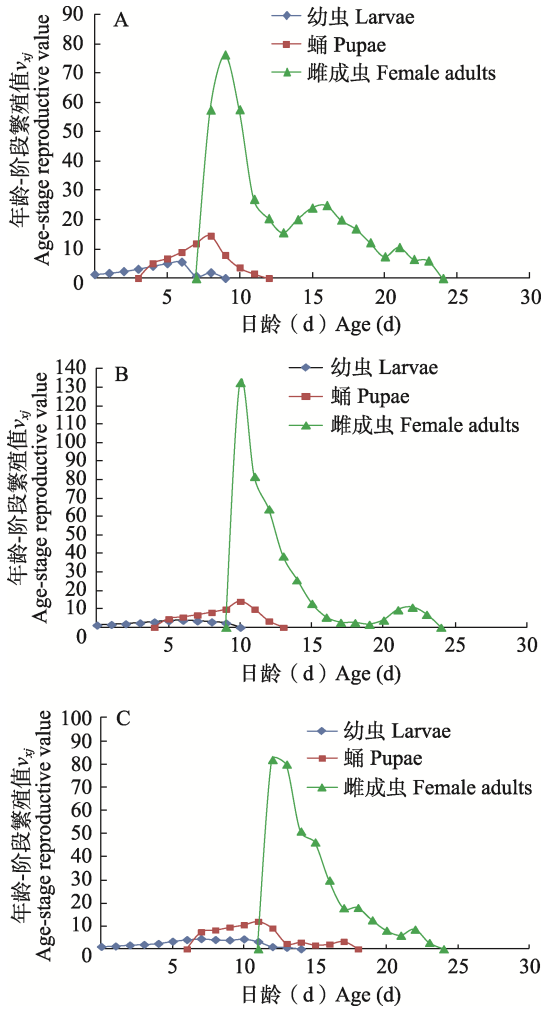


图 3　不同处理下小菜蛾的年龄-阶段繁殖值（v_{xj}）

Fig. 3　Age-stage reproductive values (v_{xj}) of *Plutella xylostella* treated with sublethal concentrations of pyridalyl

A. CK：对照；B. LC_{10}；C. LC_{25}。

A. CK: Control; B. LC_{10}; C. LC_{25}.

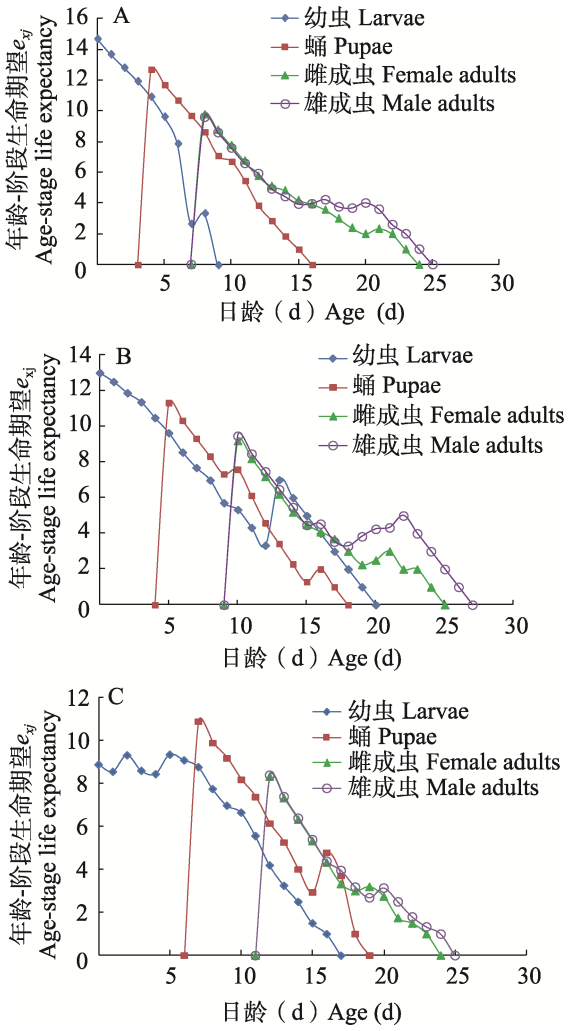


图 4　不同处理下的年龄-阶段生命期望（e_{xj}）

Fig. 4　Age-stage life expectancies (e_{xj}) of *Plutella xylostella* treated with sublethal concentrations of pyridalyl

A. CK：对照；B. LC_{10}；C. LC_{25}。

A. CK: Control; B. LC_{10}; C. LC_{25}.

照组幼虫、蛹、雌成虫及雄成虫的最大期望寿命分别为 14.70、12.69、9.76 和 9.58 d，而 LC_{10} 处理组对应虫态的最大期望寿命为 13.01、11.33、9.20 和 9.47 d，LC_{25} 处理组则进一步降至 8.89、10.89、8.33 和 8.39 d（图 4）。可见，三氟甲吡醚 LC_{10} 和 LC_{25} 处理均不同程度缩短了小菜蛾各发育阶段的期望寿命。

2.8　亚致死浓度三氟甲吡醚对小菜蛾种群生命表参数的影响

经三氟甲吡醚亚致死浓度 LC_{10}、LC_{25} 处理后，小菜蛾幼虫种群的关键生命表参数（净增殖率 R_0、内禀增长率 r_m、周限增长率 λ 及世代发育历期 T）均产生显著响应。具体表现为随药剂处理浓度的升高，处理组的 R_0、r_m 和 λ 呈明显降低趋势（$P < 0.05$），而平均世代历期 T 则显著延长（$P < 0.05$）；同时，种群相对适合度亦随之下降，LC_{10} 和 LC_{25} 处理组的相对适合度分别仅为对照组的 0.45 和 0.18（表 6）。

3　讨论

三氟甲吡醚因其独特的作用机制，与现有各类杀虫剂无交互抗性（Wang *et al*., 2020, 2021），

表 6　亚致死浓度三氟甲吡醚对小菜蛾种群的生命表参数影响

Table 6　Effects of sublehtal concentrations of pyridalyl on the life table parameters of *Plutella xylostella*

处理 Treatment	净增殖率 R_0 Net reproductive rate	内禀增长率 r_m Intrinsic growth rate	周限增长率 λ Finite rate of increase	平均世代历期 T [a] Mean generation time	相对适合度 R_f [b] Relative fitness
CK	30.30±5.43 a	0.28±0.02 a	1.33±0.02 a	12.05±0.32 c	1.00
LC_{10}	13.63±3.46 b	0.19±0.02 b	1.21±0.02 b	13.65±0.29 b	0.45
LC_{25}	5.41±1.85 c	0.11±0.02 c	1.11±0.03 c	15.99±0.59 a	0.18

[a] 指从 3 龄幼虫到成虫死亡所经历的时间。[b] 相对适合度=LC_{10}（LC_{25}）处理组的净增殖率/对照组的净增殖率。

[a] Represents the duration from the 3rd instar larva to adult death. [b] R_f = R_0 of LC_{10} (LC_{25}) treatment group / R_0 of control group.

在害虫抗药性治理及轮换用药体系中具有重要应用价值。本研究于 2023 年对太谷地区小菜蛾田间种群的毒力测定结果显示，该种群对三氟甲吡醚仍保持较高敏感性，105 mg a.i. /L 处理 3 龄幼虫 72 h 后校正死亡率达 90%，处理 96 h 后校正死亡率升至 100%。结合 10.5%三氟甲吡醚乳油在甘蓝田的推荐用量 50-70 mL/ 667 m^2 及常规用水量（50 L/667 m^2）折算，其田间推荐使用浓度为 105-147 mg a.i. /L。由此可见，在当前田间抗性水平较低的情况下，按照推荐剂量施药可对 3 龄及以下龄期幼虫实现高效防控，可为区域小菜蛾绿色防控提供可靠的药剂支撑。

杀虫剂在致死浓度下能够有效杀灭害虫，而在亚致死浓度下，仍可显著影响害虫的生长发育、繁殖及种群动态。这些影响是全面评估农药效应不可或缺的一部分，亟须深入研究（Desneux *et al.*, 2007）。本研究结果表明，三氟甲吡醚 LC_{10} 和 LC_{25} 处理显著降低小菜蛾幼虫存活率、化蛹率与羽化率，并表现出明显的浓度依赖效应；同时处理组蛹期死亡、羽化受阻及翅畸形个体比例显著上升，高浓度下畸形成虫存活时间极短。类似的发育抑制与畸形现象在多种杀虫剂亚致死效应研究中均有报道，包括氯虫苯甲酰胺、虫酰肼、氟啶脲、茚虫威、虫螨腈、氟噁唑酰胺及乙基多杀菌素等对小菜蛾的影响（谭晓伟等，2012；游灵等，2013；Tamilselvan *et al.*, 2021；Gope *et al.*, 2022）。从作用机制分析，上述发育异常可能与三氟甲吡醚代谢活化途径密切相关。该药需经细胞色素 P450 酶系代谢活化，生成具有生物活性的衍生物，进而诱导昆虫体内活性氧（reactive oxygen species, ROS）大量积累，造成蛋白质等细胞大分子的氧化损伤、蛋白酶体活性升高及细胞结构破坏（Powell *et al.*, 2011）。这种氧化应激与细胞损伤可能会进一步干扰小菜蛾蜕皮变态、组织分化及翅芽发育等关键生理过程，最终导致化蛹异常、羽化缺陷及成虫畸形。

杀虫剂亚致死剂量对害虫发育历期和蛹重的影响具有物种与药剂特异性，同种药剂对不同害虫、不同药剂对同种害虫的作用效果均存在差异。例如，溴氰虫酰胺 LC_{25} 处理可延长甜菜夜蛾 *Spodoptera exigua* 3 龄幼虫至化蛹历期，缩短成虫寿命，但对蛹期和蛹重无显著影响（余慧灵等，2015）；而同样 LC_{25} 剂量下，该药剂可显著延长双委夜蛾 *Athetis dissimilis* 幼虫历期和蛹期，降低蛹重，却对成虫寿命无影响（丁金凤等，2017）。不同药剂对同种害虫的效应亦存在差异，溴氰虫酰胺 LC_{20} 处理可显著延长斜纹夜蛾幼虫历期并增加蛹重，对蛹期及成虫寿命无影响（桑松等，2014）；而多杀菌素 LC_{20} 处理则可延长该虫幼虫期和蛹期，并降低蛹重（Rehan and Freed, 2015）。对于小菜蛾这一重要害虫，氟铃脲、茚虫威、氰氟虫腙、氯虫苯甲酰胺、乙基多杀菌素、氟噁唑酰胺等多种杀虫剂，均已被证实会对其蛹重、幼虫发育历期及其他关键发育阶段产生不同程度的抑制或延长效应（Mahmoudvand *et al.*, 2011a, 2011b；Zhang *et al.*, 2012；Guo *et al.*, 2013；Tamilselvan *et al.*, 2021；Gope *et al.*, 2022）。本研究结果进一步印证了上述物种与药剂特异性：三氟甲吡醚 LC_{10} 和 LC_{25} 处理导致小菜蛾蛹重降低，3 龄幼虫到化蛹历期与蛹期延长，且 LC_{25} 处理可缩短成虫寿命。该结果与三氟甲吡醚延长浅翅小花蝽 *Orius laevigatus* 成虫前期的结

论一致（Kordestani *et al*., 2022），但与其对西花蓟马 *Frankliniella occidentalis* 发育历期无显著影响的结果存在明显差异（Kordestani *et al*., 2021），体现出杀虫剂亚致死效应在不同物种间的多样性。除物种与药剂特异性外，杀虫剂亚致死效应还具有剂量依赖性，多数药剂表现为随浓度升高抑制作用增强，如溴氰虫酰胺对小地老虎 *Agrotis ipsilon*（Xu *et al*., 2016）及甲硫基丁醚脲对小菜蛾（Su and Xia, 2020）；也有部分药剂表现出低剂量刺激、高剂量抑制的毒物兴奋效应，如虫螨腈对韭菜迟眼蕈蚊和小菜蛾（Zhao *et al*., 2018; Jia *et al*., 2022）。本研究中小菜蛾各项指标随三氟甲吡醚浓度升高抑制效应加剧，符合典型的剂量依赖抑制模式。

亚致死浓度杀虫剂对害虫繁殖具有双重效应，既可表现为繁殖抑制，也可能因补偿效应或刺激效应而诱发再猖獗风险。阿维菌素、唑虫酰胺、甲硫基-丁醚脲和乙基多杀菌素等均被报道可显著降低美国白蛾 *Hyphantria cunea*、甜菜夜蛾、小菜蛾的繁殖力（Su and Xia, 2020; Tamilselvan *et al*., 2021；王晴等，2023；郭文丽等，2024）；而氰戊菊酯对小菜蛾、乙基多杀菌素对二斑叶螨 *Tetranychus urticae* 则表现为繁殖刺激（Fujiwara *et al*., 2002；Wang *et al*., 2016）。本研究中，三氟甲吡醚亚致死处理虽推迟小菜蛾的产卵高峰时间并降低峰值（图 2），但对单雌产卵量及卵孵化率无显著影响（表 5），该结果与三氟甲吡醚对橄榄果实蝇 *Bactrocera oleae* 繁殖力的影响模式相似（Abbasi-Mojdehi *et al*., 2019），但与其对麦蛾茧蜂 *Habrobracon hebetor* 及浅翅小花蝽的繁殖抑制效应不同（Saber and Abedi, 2013；Kordestani *et al*., 2022），这进一步揭示了该类效应在不同物种间的特异性。从生理层面分析，推测三氟甲吡醚亚致死浓度可能主要干扰成虫羽化后的生殖节律，而未对卵母细胞成熟、受精及胚胎发育等核心过程造成实质性损伤，因此产卵量与孵化率未受明显影响。

生命表参数能够从种群水平综合反映杀虫剂对昆虫的长期影响，Stark 等（1998, 2004）提出将其作为评价药剂效应的重要指标。本研究结果显示，三氟甲吡醚亚致死浓度处理显著降低小菜蛾的净增殖率 R_0、内禀增长率 r_m 和周限增长率 λ，并延长平均世代历期（T），表明其可显著抑制小菜蛾种群数量的发展。类似结果在氯虫苯甲酰胺（Han *et al*., 2012）、乙基多杀菌素（Tamilselvan *et al*., 2021）、氟苯脲（Taha, 2022）及氟噁唑酰胺（Gope *et al*., 2022）等杀虫剂亚致死处理小菜蛾的研究中均有报道，进一步说明亚致死浓度可通过影响存活、发育与繁殖共同抑制害虫种群增长，为全面评估三氟甲吡醚的控害潜能提供了种群生态学依据。

综上所述，本研究证实三氟甲吡醚除对小菜蛾具有直接致死作用外，还表现出多方面的亚致死效应：幼期阶段，可显著降低幼虫存活率、化蛹率与羽化率，抑制蛹重，并延长幼虫期与蛹期；成虫阶段，LC_{25} 处理能降低羽化雌虫比例，并缩短雌、雄成虫寿命。从种群水平看，亚致死浓度处理后，小菜蛾的净增殖率 R_0、内禀增长率 r_m 和周限增长率 λ 均显著低于对照，表明三氟甲吡醚对小菜蛾种群增长具有明显抑制作用。然而，在田间或半田间环境中，昆虫可能多世代持续暴露于亚致死剂量药剂，长期选择压力可能诱发多基因或多因素介导的抗药性演化。因此，后续仍需开展系统性田间试验，为三氟甲吡醚在小菜蛾防控中的用药剂量优化、施用时机选择及抗性治理策略制定提供更可靠的实践依据。此外，鉴于本研究发现三氟甲吡醚对小菜蛾繁殖力与卵孵化率无显著影响，其对种群动态的长期控制效果是否稳定，仍有待通过多世代连续监测研究进一步阐明。

参考文献 (References)

Abbasi-Mojdehi MR, Hajizadeh J, Zibaee A, Zibaee A, Keyhanian AA, 2019. Effect of pyridalyl on mortality, fecundity and physiological performance of olive fruit fly, *Bactrocera oleae* Rossi (Diptera: Tephritidae). *Journal of Asia-Pacific Entomology*, 22(2): 506–512.

Chen SY, Zhang ZL, Qin MQ, Wang LY, Wang XY, 2024. Research on the current situation and control of insecticide resistance in diamondback moth (*Plutella xylostella*). *Journal of Central*

China Entomological Research, 18(1): 488–509. [陈思宇, 张志林, 覃明秋, 王乐韵, 王小云, 2024. 小菜蛾的抗药性现状及治理研究. 华中昆虫研究, 18(1): 488–509.]

Chi, H, 2021. TWOSEX-MSChart: A computer program for the age-stage, two-sex life table analysis. http://140.120.197.173/Ecology.

Chi H, Liu H, 1985. Two new methods for study of insect population ecology. *Bulletin of the Institute of Zoology, Academia Sinica,* 24(2): 225–240. 37

Chi H, 1988. Life-Table analysis incorporating both sexes and variable development rates among individuals. *Environmental Entomology*, 17(1): 26–34.

Cutler GC, 2013. Insects, insecticides and hormesis: Evidence and considerations for study. *Dose-Response*, 11(2): 154–177.

Desneux N, Decourtye A, Delpuech JM, 2007. The sublehtal effects of pesticides on beneficial arthropods. *Annual Review of Entomology*, 52: 81–106.

Ding JF, Xu CM, Zhang ZQ, Zhao YH, Liu F, Mu W, 2017. Effects of cyantraniliprole on development, fecundity and Nutritional utilization of *Athetis dissimilis*. *Scientia Agricultura Sinica*, 50(22): 4307–4315. [丁金凤, 徐春梅, 张正群, 赵云贺, 刘峰, 慕卫, 2017. 溴氰虫酰胺对双委夜蛾生长发育、繁殖和营养利用的影响. 中国农业科学, 50(22): 4307–4315.]

Franca S, Breda M, Barbosa D, Araujo A and Guedes C, 2017. The sublethal effects of insecticides in insects// Shields VDC (ed.) Biological Control of Pest and Vector Insects. London: IntechOpen. 23–39.

Fujiwara Y, Takahashi T, Yoshioka T, Nakasuji F, 2002. Changes in egg size of the diamondback moth *Plutella xylostella* (Lepidoptera: Yponomeutidae) treated with fenvalerate at sublethal doses and viability of the eggs. *Applied of Entomology and Zoology*, 37(1): 103–109.

Furlong MJ, Wright DJ, Dosdall LM, 2013. Diamondback moth ecology and management: Problems, progress and prospects. *Annual Review of Entomology*, 58(1): 517–541.

Gong YH, Wu WJ, Zhang YJ, Xu BY, 2010. Selection of *Frankliniella occidentalis* with low dose of spinosad and its susceptibility to other insecticides. *Plant Protection*, 36(4): 138–141. [龚佑辉, 吴青君, 张友军, 徐宝云, 2010. 多杀菌素低剂量处理西花蓟马对药剂敏感性的影响. 植物保护, 36(4): 138–141.]

Gope A, Chakraborty G, Ghosh SM, Sau S, Mondal K, Biswas A, Sarkar, S, Sarkar PK, Roy D, 2022. Toxicity and sublethal effects of fluxametamide on the key biological parameters and life history traits of diamondback moth *Plutella xylostella* (L.). *Agronomy*, 12: 1656.

Guedes RNC and Cutler GC, 2014. Insecticide-induced hormesis and arthropod pest management. *Pest Management Science*, 70(5): 690–697.

Gu XL, Yang GQ, Liang SJ, Qin YK, Guan AY, Lv L, Song YQ, Li B, 2012. Synthesis of pyridalyl and its insecticidal activities. *Modern Agrochemicals,*, 11(3): 15–17, 27. [谷旭林, 杨桂秋, 梁松军, 秦玉坤, 关爱莹, 吕亮, 宋玉泉, 李斌, 2012. 三氟甲吡醚的合成与杀虫活性. 现代农药, 11(3): 15–17, 27.]

Guo L, Desneux N, Sonoda S, Liang P, Han P, Gao XW, 2013. Sublethal and transgenerational effects of chlorantraniliprole on biological traits of the diamondback moth, *Plutella xylostella* L.. *Crop Protection*, 48: 29–34.

Guo WL, Yang H, Duan MM, Xu H, Zhao WT, Wang CJ, 2024. Sublethal effects of tolfenpyrad and its impact on detoxifying enzymes to *Spodoptera exigua*. *Plant Protection*, 50(4): 168–175. [郭文丽, 杨慧, 段慢慢, 徐昊, 赵文甜, 王成菊, 2024. 唑虫酰胺对甜菜夜蛾亚致死效应及解毒酶活性的影响. 植物保护, 50(4): 168–175.]

Han WS, Zhang SS, Shen FY, Liu M, Ren CC, Gao XW, 2012. Residual toxicity and sublethal effects of chlorantraniliprole on *Plutella xylostella* (Lepidoptera: Plutellidae). *Pest Management Science*, 68(8): 1194–1190.

Haynes KF, 1988. Sublethal effects of neurotoxic insecticides on insect behavior. *Annual Review of Entomology*, 33: 149–168.

Isayama S, Saito S, Kuroda K, Umeda K, Kasamatsu K, 2005. Pyridalyl, a novel insecticide: potency and insecticidal selectivity. *Archives of Insect Biochemistry and Physiology*, 58(4): 226–233.

Jia BT, Hong SS, Wang L, 2015. Selection, risk assessment and cross-resistance of resistance to chlorfenapyr in the diamondback moth, *Plutella xylostella* (L.). *Journal of Environmental Entomology*, 37(1): 90–95. [贾变桃, 洪珊珊, 王龙, 2015. 小菜蛾对溴虫腈抗性筛选、风险评估及交互抗性研究. 环境昆虫学报, 37(1): 90–95.]

Jia BT, Zhang JL, Hong SS, Chang XL, Li XC, 2022. Sublethal effects of chlorfenapyr on *Plutella xylostella* (Lepidoptera: Plutellidae). *Pest Management Science*, 79(1): 88–96.

Kordestani M, Mahdian K, Baniameri V, Garjan AS, 2021. Lethal and sublethal effects of Proteus, matrine, and pyridalyl on *Frankliniella occidentalis* (Thysanoptera: Thripidae). *Environmental Entomology*, 50(5): 1137–1144.

Kordestani M, Mahdian K, Baniameri V, Garjan AS, 2022. Proteus, matrine, and pyridalyl toxicity and their sublethal effects on *Orius laevigatus* (Hemiptera: Anthocoridae). *Journal of Economic Entomology*, 115(2): 573–581.

Li ZY, Feng X, LIu SS, You MS, Furlong MJ, 2016. Diamondback

moth ecology and management: problems, progress, and prospects. *Annual of Review of Entomology*, 61: 277–296.

Liu XL, Fu ZX, Zhu YF, Gao XW, Liu TX, Liang P, 2022. Sublethal and transgenerational effects of afidopyropen on biological traits of the green peach aphid *Myzus persicae* (Sluzer). *Pesticide Biochemistry and Physiology*, 180: 104981.

Ma C, Lu XT, Liu Z, Ma SZ, Zhang TT, 2012. Sublethal effects of chlorantraniliprole and chlorpyrifos on the growth, development and fecundity of *Spodoptera exigua*. *Plant Protection*, 38(4): 38–41. [马冲, 路兴涛, 刘震, 马士仲, 张田田, 2012. 氯虫苯甲酰胺、毒死蜱亚致死剂量甜菜夜蛾生长发育和繁殖力的影响. 植物保护, 38(4): 38–41.]

Mahmoudvand M, Abbasipour H, Garjan AS, Bandani AR, 2011a. Sublethal effects of hexaflumuron on development and reproduction of the diamondback moth, *Plutella xylostella* (Lepidoptera: Yponomeutidae). *Insect Science*, 18(6): 689–696.

Mahmoudvand M, Abbasipour H, Garjan AS, Bandani AR, 2011b. Sublethal effects of indoxacarb on the diamondback moth, *Plutella xylostella* (L.) (Lepidoptera: Yponomeutidae). *Applied Entomology and Zoology*, 46(1): 75–80.

Mahmoudvand M, Moharramipour S, 2015. Sublethal effects of fenoxycarb on the *Plutella xylostella* (Lepidoptera: Plutellidae). *Journal of Insect Science*, 15(1): 821–826.

Powell GF, Ward DA, Prescott MC, Spiller DG, White MRH, Turner PC, Earley FGP, Phillips J, Rees HH, 2011. The molecular action of the novel insecticide, pyridalyl. *Insect Biochemistry and Molecular Biology*, 41(7): 459–469.

Rehan A, Freed S, 2015. Lethal and sub-lethal effects of spinosad on the life-history traits of army worm, *Spodoptera litura* (Fabricius) (Lepidoptera: Noctuidae), and its fitness cost of resistance. *Entomological Research*, 45(5): 247–253.

Saber M, Abedi Z, 2013. Effects of methoxyfenozide and pyridalyl on the larval ectoparasitoid *Habrobracon hebetor*. *Journal of Pest Science*, 86: 685–693.

Sakamoto N, Hirose T, Saito S, Umeda K, 2012. Discovery and development of pyridalyl. *Journal of Pesticide Science*, 37(3): 265–266.

Sang S, Shu BS, Hu MY, Wang Z, Zhong GH, 2014. Sublethal effects of cyantraniliprole on the development and reproduction of the cabbage cutworm, *Spodoptera litura*. *Journal of South China Agricultural University*, 35(5): 64–68. [桑松, 舒本水, 胡美英, 王政, 钟国华, 2014. 溴氰虫酰胺对斜纹夜蛾生长发育及繁殖的亚致死效应. 华南农业大学学报, 35(5): 64–68.]

Shi XQ, Zhang M, Gu Q, Bai YL, Feng J, 2003. New varieties introduced at the 2002 Brighton Crop Protection Conference. *Modern Agrochemicals*, 2(1): 31–35. [石小清, 张梅, 顾群, 柏亚罗, 冯坚, 2003. 2002 年布莱顿植保会议介绍的新品种. 现代农药, 2(1): 31–35.]

Sparks TC, Crossthwaite AJ, Nauen R, Banba S, Cordova D, Earley F, Ebbinghaus-Kintscher U, Fujioka S, Hirao A, Karmon D, Kennnedy R, Nakao T, Popham HJR, Salgdo V, Watson GB, Wedel BJ, Wessels FJ, 2020. Insecticides, biologics and nematicides: Updates to IRAC's mode of action classification-a tool for resistance management. *Pesticide Biochemistry and Physiology*, 167: 104587.

Stark JD, Banken JAO, Walthall WK, 1998. The importance of the population perspective for the evaluation of side effects of pesticides on beneficial species// Haskell PT, McEwen P (eds.). Ecotoxicology: Pesticides and Beneficial Organisms. Boston: Springer. 348–359.

Stark JD, Banks JE, Acheampong S, 2004. Estimating susceptibility of biological control agents to pesticides: Influence of life history strategies and population structure. *Biological Control*, 29(3): 392–398.

Su CY, Xia XM, 2020. Sublethal effects of methylthio-diafenthiuron on the life table parameters and enzymatic properties of the diamondback moth, *Plutella xylostella* (L.) (Lepidoptera: Plutellidae). *Pesticide Biochemistry and Physiology*, 162: 43–51.

Sun Y, Qin WJ, Huang SJ, Qin HG, 2018. Risk assessment and biochemical mechanisms responsible for resistance to pyridalyl in the diamondback moth, *Plutella xylostella* (Linnaeus). *Chinese Journal of Applied Entomology*, 55(3): 481–488. [孙杨, 秦文婧, 黄水金, 秦厚国, 2018. 小菜蛾对三氟甲吡醚的抗性风险评价与抗性生化机制研究. 应用昆虫学报, 55(3): 481–488.]

Taha HSE, 2022. Teflubenzuron toxicity impact and resistance consequences on *Plutella xylostella* L. (Lepidoptera: Plutellidae) fitness. *Asian Journal of Research and Review in Agriculture*, 4(2): 42–49.

Talekar NS, Shelton AM, 1993. Biology, ecology, and management of the diamondback moth. *Annual Review of Entomology*, 38(1): 275–301.

Tamilselvan R, Kennedy JS, Suganthi A, 2021. Sublethal and transgenerational effects of spinetoram on the biological traits of *Plutella xylostella* (L.) (Lepidoptera: Plutellidae). *Ecotoxicology*, 30(4): 667–677.

Tan XW, Ren L, Xu XB, Rui CH, 2012. Sublethal effects of chlorantraniliprole on the diamondback moth, *Plutella xylostella* (Linnaeus). *Plant Protection*, 38(4): 42–46. [谭晓伟, 任龙, 徐希宝, 芮昌辉, 2012. 氯虫苯甲酰胺对小菜蛾亚致死效应的研

究. 植物保护, 38(4): 42–46.]

Verkerk RHJ, Wright DJ, 1996. Multitrophic interactions and management of the diamondback moth: A review. *Bulletin of Entomological Research*, 86(3): 205–216.

Wang L, Zhang YJ, Xie W, Wu QJ, Wang SL, 2016. Sublethal effects of spinetoram on the two-spotted spider mite, *Tetranychus urticae* (Acari: Tetranychidae). *Pesticide Biochemistry and Physiology*, 132: 102–107.

Wang Q, Yuan LS, Li T, Jiang D, Yan SC, 2023. Effects of sublethal concentrations of abamectin on larval growth, development and adult reproductive capability of *Hyphantria cunea*. *Chinese Journal of Applied Entomology*, 60(1): 69–75. [王晴, 袁莉莎, 李涛, 姜礅, 严善春, 2023. 阿维菌素亚致死浓度对美国白蛾幼虫生长发育及成虫繁殖能力的影响. 应用昆虫学报, 60(1): 69–75.]

Wang R, Fang Y, Zhang JS, Wang JD, Feng HL, Luo C, 2021. Characterization of field-evolved resistance to pyridalyl in a near-isogenic line of diamondback moth, *Plutella xylostella*. *Pest Management Science*, 77(3): 1197–1203.

Wang R, Qu C, Wang ZY, Yang GF, 2020. Cross-resistance, biochemical mechanism and fitness costs of laboratory selected resistance to pyridalyl in diamondback moth, *Plutella xylostella*. *Pesticide Biochemistry and Physiology*, 163: 8–13.

Wang YB, 2020. Focusing on cruciferous vegetables: new attempts enrich the vegetable basket. *Science and Technology Daily*, 2020–11–30 (007). [王延斌, 2020. 聚焦十字花科蔬菜, 菜篮子里装满新尝试. 科技日报, 2020–11–30 (007).]

Xu, CM, Zhang ZQ, Cui KD, Zhao YH, Han JK, Liu F, Mu W, 2016. Effects of sublethal concentrations of cyantraniliprole on the development, fecundity and nutritional physiology of the black cutworm *Agrotis ipsilon* (Lepidoptera: Noctuidae). *PLoS ONE*, 11(6): e0156555.

Yin CY, Wang R, Luo C, Zhao K, Wu QY, Wang ZY, Yang GF, 2019. Monitoring, cross-resistance, inheritance, and synergism of *Plutella xylostella* (Lepidoptera: Plutellidae) resistance to pyridalyl in China. *Journal of Economic Entomology*, 112(1), 329–334.

Yin XH, Wu QJ, Li XF, Zhang YJ, Xu BY, 2009. Demographic changes in multigeneration *Plutella xylostella* (Lepidoptera: Plutellidae) after exposure to sublethal concentrations of spinosad. *Journal of Economic Entomology*, 102(1): 357–365.

You L, Wang GL, Tian SR, Wei HY, 2013. Sublethal effects of four low-toxicity insecticides on the development and reproduction of the diamondback moth, *Plutella xylostella* (Lepidoptera: Plutellidae). *Acta Phytophylacica Sinica*, 40(6): 551–556. [游灵, 王广利, 田生荣, 魏洪义, 2013. 四种低毒杀虫剂对小菜蛾生长发育及繁殖的亚致死效应. 植物保护学报, 40(6): 551–556.]

Yu HL, Xiang X, Yuan GX, Chen YQ, Wang XG, 2015, Effects of sublethal doses of cyantraniliprole on the growth and development and the activities of detoxifying enzymes in *Spodoptera exigua* (Lepidoptera: Nocuidae). *Acta Entomologica Sinica*, 58(6): 634–641. [余慧灵, 向兴, 袁贵鑫, 陈羿渠, 王学贵, 2015. 溴氰虫酰胺亚致死剂量对甜菜夜蛾生长发育及体内解毒酶活性的影响. 昆虫学报, 58(6): 634–641.]

Zalucki MP, Shabbir A, Silva R, Adamson D, Liu SS, Furlong MJ, 2012. Estimating the economic cost of one of the world's major insect pests, *Plutella xylostella* (Lepidoptera: Plutellidae): just how long is a piece of string? *Journal of Economic Entomology*, 105(4): 1115–1129.

Zhang Z, Li JH, Gao XW, 2012. Sublethal effects of metaflumizone on *Plutella xylostella* (Lepidoptera: Plutellidae). *Journal of Integrative Agriculture*, 11(7): 1145–1150.

Zhao YH, Wang QH, Ding JF, Wang Y, Zhang ZQ, Liu F, Mu W, 2018. Sublethal effects of chlorfenapyr on the life table parameters, nutritional physiology and enzymatic properties of *Bradysia odoriphaga*. *Pesticide Biochemistry and Physiology*, 148: 93–102.